

На правах рукописи



ЛЕ Ван Чонг

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ,
ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ В ГРУНТЕ,
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИЧЕСКИХ
ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Специальность: 05.23.02 – «Основания и фундаменты, подземные сооружения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Кондратьева Лидия Никитовна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Никифорова Надежда Сергеевна**
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», кафедра Механики грунтов
и геотехники, профессор;

Гурский Александр Витальевич
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«ПКТИ Фундамент-тест» г. Санкт-Петербург,
заместитель директора по проектно-изыскательным
работам;

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I»**

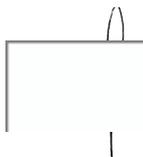
Защита диссертации состоится «06» октября 2021 г. в 12:30 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.07** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4. зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220).

Тел./Факс: (812) 316-58-73
E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/le-van-chong>

Автореферат разослан «01» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Конюшков Владимир Викторович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время направления развития в крупных и малых городах характеризуются высотными зданиями и сооружениями с развитым подземным пространством. Эти сооружения передают значительные нагрузки на грунты основания, поэтому необходимо заглублять сваи на большую глубину в надежных грунтах (например, в моренных или вендских отложениях Санкт-Петербурга). В Санкт-Петербурге имеются толщи (20...30 м и более) сильнодеформируемых грунтов с модулями деформации 5...10 МПа. Кроме этого, вследствие длительных геологических процессов, происходивших тысячи лет назад, слабые грунты крайне неравномерно распределены по глубине и площади залегания. Оценка несущей способности свай остается одним из сложных разделов в геотехнических расчетах за исключением простых расчетных схем, отраженных в технических регламентах. Наиболее надежной теоретической базой для количественной оценки несущей способности свай на вертикальную нагрузку является статический полевой метод. Таким образом, повышение точности и достоверности расчетов несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга позволяет определить подходящую технологию изготовления свай и оптимальные размеры (диаметр, длина) с целью повышения надежности, снижения их ресурсоемкости, затрат на строительство, поэтому тема исследования является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам изучения несущей способности свай уделяли большое внимание теоретики-экспериментаторы: С. Я. Боженков, А. А. Бирюков, А. Л. Готман, Н. З. Готман, В. Н. Голубков, Б. И. Далматов, Б. И. Дидух, В. В. Знаменский, А. А. Луга, Л. С. Лapidус, Ф. К. Лапшин, Р. А. Мангушев, Н. С. Никитина, А. И. Осокин, В. Н. Парамонов, А. Б. Пономарев, Ю. В. Россихин, С. Н. Сотников, З. Г. Тер-Мартirosян, А. З. Тер-Мартirosян, В. М. Улицкий, В. С. Уткин, А. Б. Фадеев, А. Г. Шашкин и другие исследователи.

Анализировали влияние на несущую способность свай, изготавливаемых в грунте, технологии изготовления: В. В. Верстов, А. Н. Гайдо, А. Л. Готман, В. Н. Парамонов, В. В. Конюшков, А. А. Луга и другие ученые.

Особенности характеристик компонентов геологической среды Санкт-Петербурга, влияющих на условия строительства, описаны в работах А. А. Алейникова, П. О. Бойченко, Р. Э. Дашко, Л. Г. Заварзина, А. А. Кагана, В. М. Фурсы и других ученых.

Исследованием особенностей работы системы «свая-грунт» занимались зарубежные авторы: Дж. Б. Берланд, Х. Брандль, В. Ф. Ван Импе, Г. Д. Полос, Р. Б. Пек, А. У. Скемптон, К. Терцаги и других ученых.

Методикам анализа графиков «нагрузка-осадка» по результатам полевых испытаний свай под воздействием вертикальной статической нагрузки посвящены работы Б. И. Далматова, Ф. К. Лапшина, Б. В. Лисицина, Ю. В. Росихина, М. Т. Davisson, Е. Е. Debeer, J. В. Hansen, F. K. Chin.

Целью диссертационной работы является сравнительная оценка несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, по результатам полевых испытаний в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга для более достоверной оценки допускаемой нагрузки на сваю.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Проанализировать основные факторы, которые влияют на несущую способность свай, изготавливаемых в грунте.

2. Разработать схемы распространения моренных и вендских отложений в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

3. Произвести статистическую обработку результатов полевых статических испытаний более чем 600 буровых свай, выполненных обществом с ограниченной ответственностью «ПКТИ ФУНДАМЕНТ-ТЕСТ» с 2000 по 2020г.

4. Сопоставить диаграммы несущей способности по грунту буровых свай, вычисленных по существующим техническим нормам и полученных в результате статических полевых испытаний.

5. Выполнить прогноз несущей способности по грунту буровых свай до 100 м.

Объект исследования: Сваи, изготавливаемые в грунте.

Предмет исследования: Несущая способность свай, изготавливаемых в грунте.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Получена зависимость типа технологии изготовления свай на несущую способность свай, изготавливаемых в грунте, по существующим техническим нормам и литературным источникам.

2. Оформлены в цвете схемы распространения моренных и вендских отложений в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

3. Предложены корректирующие коэффициенты, позволяющие более точно рассчитывать несущую способность буровых свай по грунту в зависимости от технологии их изготовления и глубины заложения острия свай.

4. Получены значения несущей способности по грунту буровых свай глубиной заложения до 100 м.

Практическая значимость диссертационного исследования: заключается в возможности применения разработанных схем распространения моренных и вендских отложений для оценочных расчетов при проектиро-

вании свай, изготавливаемых в грунте, в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Получены значения несущей способности по грунту буровых свай глубиной заложения до 100 м. с дополнительными корректирующими коэффициентами к несущей способности свай в зависимости от физических свойств грунтов по боковой поверхности и под пятой.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании использования корректирующих коэффициентов, более достоверно оценивающих несущую способность буровых свай, расположенных в моренных или вендских отложениях.

Методология и методы исследования.

1. На основе анализа литературных источников было выполнена оценка влияния взаимодействия свай, изготавливаемых в грунте, с грунтовым массивом в период их изготовления на несущую способность по грунту для точного расчета.

2. Статистическая обработка и анализ большого объема данных полевых статических испытаний буровых свай.

3. Сопоставительный анализ результатов аналитического расчета несущей способности по грунту буровых свай с результатами статических полевых испытаний свай.

Область исследования. Согласно сформулированной цели научной работы, её научной новизне и установленной практической значимости диссертация соответствует паспорту специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункт 4 – «Разработка новых методов расчета, конструирования и устройства фундаментов на естественном основании, глубокого заложения и свайных фундаментов с учетом взаимодействия их с надфундаментными конструкциями, фундаментами близрасположенных зданий и сооружений и конструкциями подземных сооружений».

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов исследований и выводов подтверждаются применением основных положений, механики деформируемого твердого тела, моделей механики грунтов, численного моделирования и математической статистики для обработки большего объема данных полевых испытаний свай с использованием метода наименьших квадратов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка влияния особенностей технологии изготовления свай, изготавливаемых в грунте, на их несущую способность.

2. Аналитические способы расчётов несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, на вертикальную нагрузку.

3. Результаты статистической обработки данных полевых испытаний для повышения точности и достоверности расчета несущей способности по грунту буровых свай.

4. Сопоставление результатов аналитических расчетов, выполненных по разработанной методике, с численными.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 71-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (3–5 апреля 2019 г., СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); V Международной учебно-практической молодежной конференции по Геотехнике. (25–27 сентября 2019 г., НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, г. Москва); 75-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт». (19–20 ноября 2019 г., СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); 73-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства» (08–10 апреля 2020 г., СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 публикации в журналах из перечня ВАК и две статьи в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 145 страниц, включая 47 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 141 наименование.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены: цель диссертационной работы, задачи исследования, объект, предмет и методы исследования; сформулированы научная новизна, практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации научных результатов, общей структуре и объёме диссертации.

В первой главе в настоящее время область применения свай, изготавливаемых в грунте, становится все более популярным и широко используется в мире и в России. Сваи, изготавливаемые в грунте, позволяют передать значительные нагрузки на основание от зданий и сооружений. В работе про-

анализированы следующие отечественные технологии изготовления буронабивных свай, которые в основном применяются в Санкт-Петербурге в гражданском строительстве: технология проходного шнека, технология глинистого раствора, технология обсадной трубы, технология свай «DDS» (Drilling Displacement System), технология свай «FUNDEX» и технология свай «ATLAS». Приведены последовательность устройства свай, область применения некоторых технологий изготовления буронабивных свай в грунте, отражены их достоинства и недостатки с экономической и технической точки зрения. Для современного высотного строительства в больших городах требует применения свай глубокого заложения на надежных грунтах. В связи с тем, что набивные сваи ограничены геологическими условиями на площадке (грунты преимущественно расположены под острием свай: суглинки тугопластичные и полутвердые; супеси и глины твердые; пески пылеватые и гравелистые, плотные), параметрами размеров свай: диаметром и длиной, а также влиянием на дно котлована и фундаментов вблизи соседних существующих зданий и сооружений в процессе изготовления свай, поэтому повышение точности и достоверности расчетов несущей способности буровых свай по грунту, расположенных в моренных или вендских отложениях является актуальной темой.

Несущая способность свай зависит от многих факторов, таких как: точное определение толщины слоя грунта с физико-механическими свойствами; параметры проектирования – выбор метода расчетов, а также входные параметры и граничные условия; технология изготовления свай по различным технологиям. Одной из главных особенностей свай, изготавливаемых в грунте, является частый перерасход бетонной смеси из-за технологических параметров бетонирования. Перерасход бетонной смеси приводит к уплотнению стенок скважины и увеличению несущей способности свай, поэтому важным вопросом является определение расхода бетонной смеси.

Количество бетонной смеси, поданной в скважину, можно вычислить, зная изменение радиуса грунтовой полости Δr :

$$\Delta r = \frac{(1 + \nu) \cdot r \cdot \sigma_{гор.бет.}}{E}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона грунта; r – радиус сваи, м; $\sigma_{гор.бет.}$ – давление бетонной смеси на грунт, кПа; $\sigma_{верт.бет.}$ – давление бетонной смеси на грунт при бетонировании, равно 300 кПа; ξ – коэффициент бокового давления бетонной смеси, $\xi = 0,9 - 1$; E – модуль деформации грунта, кПа.

Зная изменение радиуса Δr , можно вычислить коэффициент удельного перерасхода бетона k_s и коэффициент удельного увеличения периметра сваи f_s по формулам:

$$k_s = \frac{V + \Delta V}{V}, \quad (2)$$

$$f_s = \frac{u + \Delta u}{u}, \quad (3)$$

где V – объём сваи, м³; u – периметр сваи, м.

При устройстве буронабивных свай происходит нарушение и разрушение структурных связей грунта, окружающего скважину. Под давлением бетона наблюдается уплотнение грунта, окружающего стенки скважины, поэтому образуются местные уширения у ствола сваи.

На рисунке 1 представлен график изменения коэффициента перехода бетонной смеси и коэффициента удельного увеличения периметра сваи в зависимости от модуля деформации грунта.

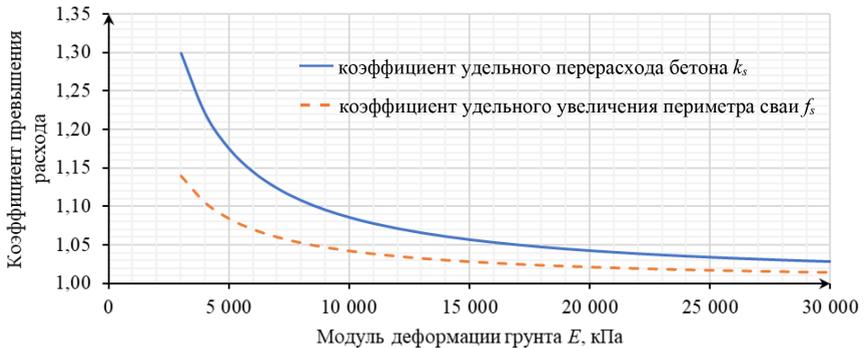


Рисунок. 1. График изменения коэффициентов удельного бетона и коэффициента удельного увеличения периметра сваи в зависимости от модуля деформации грунта

Процесс устройства буровых свай приводит к нарушению и разрушению структурных связей в грунте, окружающего скважину, поэтому расход бетонной смеси носит неравномерное распределение по глубине сваи. Определено, что возможно увеличение расхода бетонной смеси до 130%. Это приводит к уплотнению грунта вокруг скважины, поэтому увеличивается трение по боковой поверхности сваи.

Во второй главе приведены особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. По результатам исследований получены ориентировочные значения физико-механических характеристик грунтов, используемых в качестве основания существующих зданий и сооружений и объектов нового строительства. Оформлены схематичные карты глубин залегания

кровли ледниковых моренных отложений и дочетвертичных вендских глин, которые преимущественно являются несущими грунтами для свайных фундаментов. Рассмотрены основные способы расчетов несущей способности свай по грунту. Сравнились результаты расчетов несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, получаемые расчетным методом и полевыми испытаниями в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга по различным методикам.

На основе архивных материалов инженерных изысканий ГУП «Трест ГРИИ» и ЗАО «ЛенТИСИЗ» в Санкт-Петербурге за последние 50 лет выполнена приблизительная классификация грунтов по их происхождению, глубине залегания и прочностным и деформационным свойствам с оценкой их деформируемости.

В общем виде генезис грунтов Санкт-Петербурга можно разделить на четыре основных комплекса отложений, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Ориентировочные значения физико-механических характеристик грунтов Санкт-Петербурга в зависимости от их генезиса

Показатели	Обозначение, единица измерения	Наименование генезиса грунтов			
		1. Свойства речных и морских отложений ($a_{1,IV}$, m_{IV})	2. Свойства озерно-ледниковых отложений (g_{IV})	3. Свойства ледниковых моренных супесей и суглинков (g_{III})	4. Свойства дочетвертичных вендских глин (ukt_2)
Удельный вес	γ , кН/м ³	17...20	17...20	18...20	20...22
Влажность	W , %	50...30	50...30	30...20	20...10
Коэффициент пористости	e , д.е.	более 1,0...0,6	более 1,0...0,6	0,8...0,5	0,5...0,3
Показатель текучести	I_L , д.е.	более 1,0...0,75 (для глинистых грунтов)	более 1,0...0,75 (для глинистых грунтов)	0,75...0,25	менее 0,25
Удельное сцепление	c , кПа	1...20 (для песков)	5...20	20...50	50...100 и более
Угол внутреннего трения	φ , °	20...30 (для песков)	5...20	15...30	15...30
Модуль деформации	E , МПа	5...15	5...15	15...40	20...100 и более

Окончание табл. 1

Показатели	Обозначение, единица измерения	Наименование генезиса грунтов			
		1. Свойства речных и мор- ских отложений ($al_{IV} ml_{IV}$)	2. Свойства озерно-леднико- вых отложений (lg_{IV})	3. Свойства ледниковых мо- ренных супесей и суглинков (g_{III})	4. Свойства дочетвертич- ных вендских глин (vkt_2)
Отложения	Индекс	Характеристика			
Речные и морские отложения	$al_{IV} ml_{IV}$	Сильнодеформируемые, водонасыщенные, слабодо-проницаемые грунты. Расположены под подошвой фунда-ментов большинства исторических зданий Санкт-Пе-тербурга.			
Озерно-ледниковые отложения	lg_{IV}	Сильнодеформируемые грунты. Подстилают основание большинства фундаментов зданий и сооружений, по-строенных на естественном основании.			
Ледниковые моренные отложения	g_{III}	Среднедеформируемые грунты. Преимущественно рас-положены под подошвой свайных фундаментов боль-шинства зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.			
Дочетвертич-ные вендские глины	vkt_2	Слабдеформируемые грунты. Преимущественно рас-положены под подошвой свайных фундаментов высот-ных зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.			

С целью предварительной оценки глубины заложения острия свай составлены карты глубин залегания моренных и вендских отложений в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга (на основе инженерно-геологического районирования ГУП ТРЕСТ ГРИИ).

На основе схематических карт грунтов Л. Г. Заварзина разработаны схематичные карты Санкт-Петербурга с глубиной залегания кровли ледниковых моренных и дочетвертичных вендских отложений (рис. 2).

Для определения несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, по грунту на вертикальную нагрузку в работе применены существующие основные методики:

А) – по табличным значениям сопротивлений грунтов по боковой поверхности и под пятой сваи;

Б) – по построенным графикам сопротивлений грунтов методом нелинейной экстраполяции;

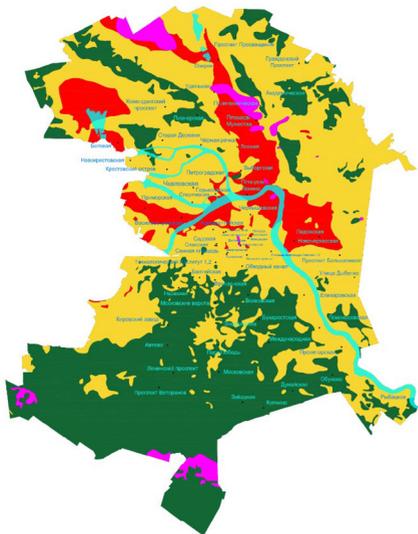
В) – по прочностным характеристикам грунтов на основе научных исследований и рекомендаций технических регламентов;

Г) – путем численного моделирования работы сваи под нагрузкой с использованием программного комплекса PLAXIS;

Д) – по результатам статического зондирования грунтов;

Е) – по результатам статических полевых испытаний свай на строительной площадке.

а)



б)

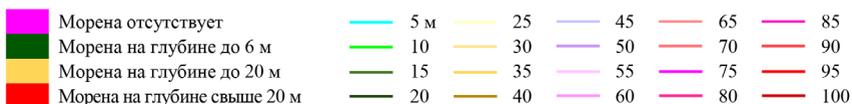


Рисунок 2. Схематичная карта Санкт-Петербурга с цветовым отображением глубины залегания кровли ледниковых моренных (а) и дочетвертичных вендских отложений (б)

Для сваи диаметром 2,0 м и длиной 83,8 м выполнены аналитические расчеты несущей способности по различным методикам и проведено сравнение результатов расчетов с численным моделированием и статическим полевым испытанием сваи.

Характеристики 14 ИГЭ, полученные по результатам инженерно-геологических исследований грунтов на площадке, представлены в рисунке 3.

В таблице 2 приведены результаты оценки несущей способности сваи, выполненной по различным методикам.

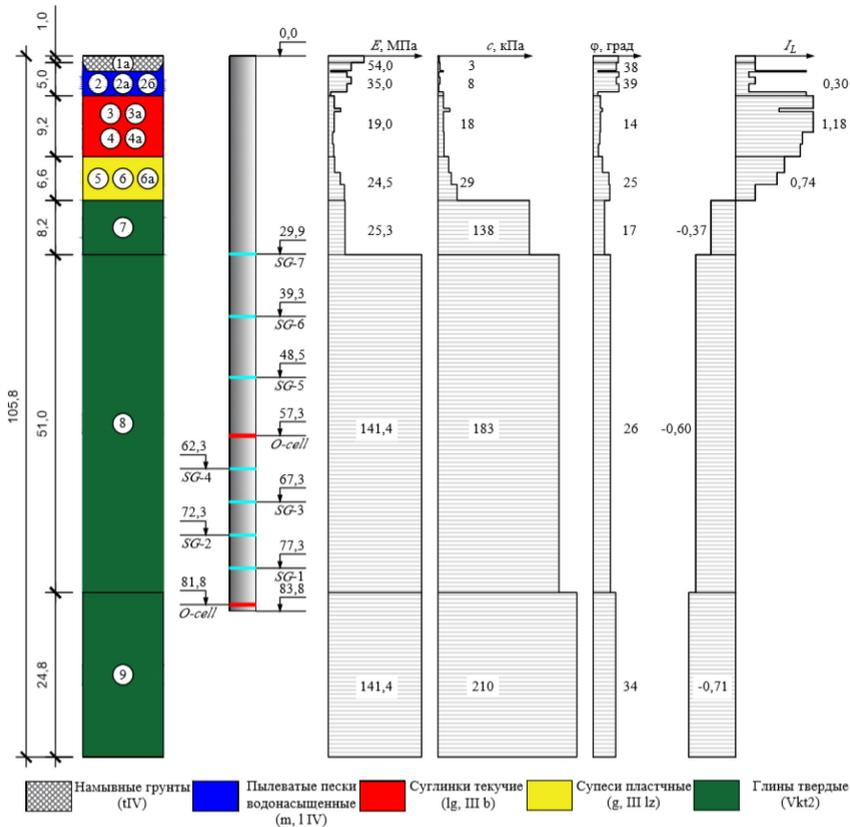


Рисунок. 3. Инженерно-геологический разрез с местами расположения силовых ячеек в свае для проведения полевых испытаний

Таблица 2 – Результаты несущей способности опытной сваи, определенной по различным методикам

Инд.	Методика расчета несущей способности сваи	Значение несущей способности сваи, МН	Соотношение фактической и расчетной несущей способности сваи, $F_{field\ test}/F_d$
А	Несущая способность сваи по норме $F_{d\ p}$	42,36	3,2
Б	Несущая способность сваи по нелинейной экстраполяции F_d	64,18	2,1

Окончание табл. 2

Инд.	Методика расчета несущей способности сваи	Значение несущей способности сваи, МН	Соотношение фактической и расчетной несущей способности сваи, $F_{field\ test}/F_d$
Г	Несущая способность сваи по Plaxis 3D при осадке 40 мм F_d	82,16	1,7
В	Несущая способность сваи по прочностным характеристикам F_d	96,32	1,4
Е	Результаты полевых испытаний $F_{field\ test}$	136,3 ¹	–

Таким образом, полевые испытания опытной буровой сваи глубокого заложения диаметром 2,0 м и длиной 83,8 м показало, что ее несущая способность:

- в 3 раза выше несущей способности, полученной по расчетам технических регламентов;
- в 2 раза выше несущей способности, полученной нелинейной экстраполяции;
- в 1,7 раза выше значения несущей способности при осадке сваи, равной 40 мм, при численном моделировании в программе Plaxis;
- в 1,4 раза выше несущей способности, определенной по прочностным характеристикам грунтов.

Анализируя результаты таблицы 2, можно сделать вывод, что наиболее близкое значение несущей способности сваи (к результату полевого испытания) дает методика расчета сваи по прочностным характеристикам грунта. Это объясняется тем фактом, что большая часть боковой поверхности и пяты сваи расположена в вендских глинах, характеризующихся углом внутреннего трения 34° и удельным сцеплением 210 кПа. Эти прочностные характеристики с учетом площади боковой поверхности и пяты сваи в значительной мере и определяют общую несущую способность сваи по грунту.

В результате статистической обработки многочисленных данных статистических полевых испытаний определены критерии по выбору методик расчета

¹ Результаты полевого испытания сваи предоставлены генеральным директором ЗАО «Геострой» к.т.н. А. И. Осокиным. Полевые испытания проводились под руководством канд. техн. наук, доцента С. В. Татарнинова инженерами А. Б. Серебряковой, А. А. Беляшовым, В. В. Войтович.

несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, в зависимости от длины, технологии изготовления и инженерно-геологических условий (таб. 3).

Таблица 3 – Рекомендации по выбору способов расчетов несущей способности свай в зависимости от технологии изготовления, длины и генезиса грунтов под острием свай (морена или венд)

Грунтовые условия и длина свай		Технология проходного шнека	Технология глинистого раствора	Технология обсадной трубы	Рекомендуемые способы расчетов несущей способности свай
грунты	до мореного отложения	+	+	+	А; Г; Д; Е
	до вендского отложения	±	+	+	Б; В; Г; Д; Е
длина свай, м	< 20	+	+	+	А; Г; Д; Е
	20 – 30	+	+	+	
	30 – 40	+	+	+	
	40 – 50	–	+	+	Б; В; Г; Е
	50 – 60	–	+	+	
	> 60	–	±	+	

Примечания: «+», «±» и «–» - технология свай применима, возможно к применению и не применима соответственно.

В третьей главе была проведена полномасштабная статистическая обработка полевых статических испытаний более чем 600 буровых свай, проведенных ООО ПКТИ «Фундамент-тест» в Санкт-Петербурге с 2000 по 2020 гг. В таблице 4 представлены некоторые геометрические параметры свай и значения вдавливающих нагрузок при испытаниях.

Таблица 4 – Геометрические параметры свай и значения нагрузок при испытаниях

Наименование технологии	Количество n , свай	Диаметр свай D , м	Длина свай L , м	Максимальная нагрузка при испытаниях N , кН
Технология обсадной трубы	119	до 2,00	до 85	до 136000

Окончание табл. 4

Наименование технологии	Количество n , свай	Диаметр свай D , м	Длина свай L , м	Максимальная нагрузка при испытаниях N , кН
Технология глинистого раствора	187	до 0,62	до 35	до 3500
Технология проходного шнека	299	до 0,67	до 28	до 3000

Статистическая обработка выполнена путем регрессионного анализа с использованием метода наименьших квадратов. По итогам обработки построены графики корреляции между несущей способностью свай, вычисленной по техническим регламентам и полученной в результате полевых испытаний с учетом технологии их изготовления и глубины заложения острия свай. На основе анализ многочисленных результатов статических полевых испытаний получены корректирующие коэффициенты k , позволяющие более точно рассчитать несущую способность буровых свай по грунту.

Согласно сравнительной статистической обработке по боковой поверхности свай преимущественно расположены грунты с модулем деформации до 10 МПа (до 60% случаев). Под острием сваи преимущественно расположены грунты с модулем деформации от 10 до 20 МПа (более 50% случаев).

На рисунке 4 приведена сравнительная диаграмма относительной частоты распределения отношения F_u/F_d по интервалам. Отношение F_u/F_d было распределено на семь интервалов: $0,5 < k \leq 1,0$; $1,0 < k \leq 1,5$; $1,5 < k \leq 2,0$; $2,0 < k \leq 2,5$; $2,5 < k \leq 3,0$; $3,0 < k \leq 3,5$; $k > 3,5$.

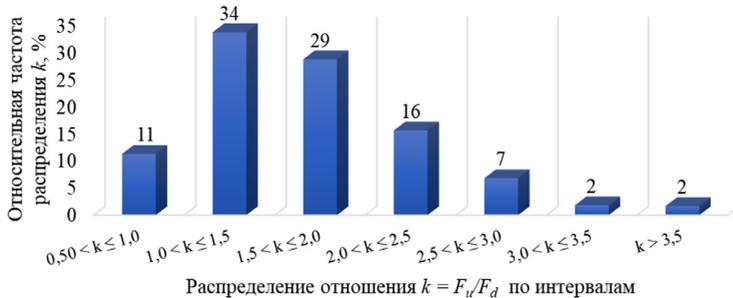


Рисунок 4. Сравнительная диаграмма относительной частоты распределения отношения $k = F_u/F_d$ по интервалам (частотам распределения k)

Большая часть испытанных буровых свай по результатам полевых испытаний, превышает несущую способность, рассчитанную по таблицам

СП 24.13330.2011 до 2 раз (63% испытаний). Очевидно, что разброс значений несущей способности до 2 раз (200%) не является достаточной и достоверной величиной для проектирования и строительства свайных фундаментов.

Вид аппроксимирующей функции представлен следующей формулой:

$$F_u = f(F_d, k) = k \cdot F_d, \quad (4)$$

где k – корректирующий коэффициент; F_d – несущая способность сваи с использованием табличных значений сопротивления грунтов СП 24.13330.2011, кН; F_u – несущая способность сваи, полученная в результате полевых испытаний, кН.

Величина суммы квадратов отклонений S , равная сумме квадратов разности между значениями многочлена и функции для n точек $F_{d,1}, F_{d,2}, \dots, F_{d,n}$:

$$S = S(k) = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (f(F_{d,i}, k) - F_{u,i})^2 = \sum_{i=1}^n (k \cdot F_{d,i} - F_{u,i})^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

где n – количество статических полевых испытаний свай; $F_{d,i}$ – несущая способность сваи с использованием табличных значений сопротивления грунтов СП, соответствующая i -й свае, кН; $F_{u,i}$ – несущая способность сваи, полученная в результате полевых испытаний, соответствующая i -й свае, кН.

Величина R^2 является мерой точности функции регрессии в теории вероятностей и статистики, определяемой по следующей формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (k \cdot F_{d,i} - F_{u,i})^2}{\sum_{i=1}^n (F_{u,i} - \bar{F}_u)^2} \rightarrow 1. \quad (6)$$

где R^2 – коэффициент детерминации; \bar{F}_u – среднее значение несущей способности свай, полученное в результате полевых испытаний.

Полученные величины детерминации R^2 находятся в пределах от 0,87 до 0,95. Эти величины указывают на тесную взаимосвязь между несущей способностью свай, полученной в результате полевых испытаний (F_u) и определенной по техническим регламентам (F_d).

Влияние технологии изготовления свай, на их несущую способность

В исследовании были выполнены аналитические расчеты несущей способности свай по грунту с использованием табличных значений сопротивления грунтов СП для каждой испытанной сваи. Получены сравнительные результаты определения несущей способности свай с помощью аналитических расчетов и при полевых испытаниях путем отношения $k = F_u/F_d$ для каждой технологии изготовления. Минимальное значение k составило 0,5, максимальное значение $k = 4,4$. Также были определены соотношения расчетных сопротивлений грунта по боковой поверхности и под острием свай.

На рисунке 5 приведены сравнительные диаграммы значений несущей способности свай, полученных по результатам полевых испытаний и рассчитанной по СП.

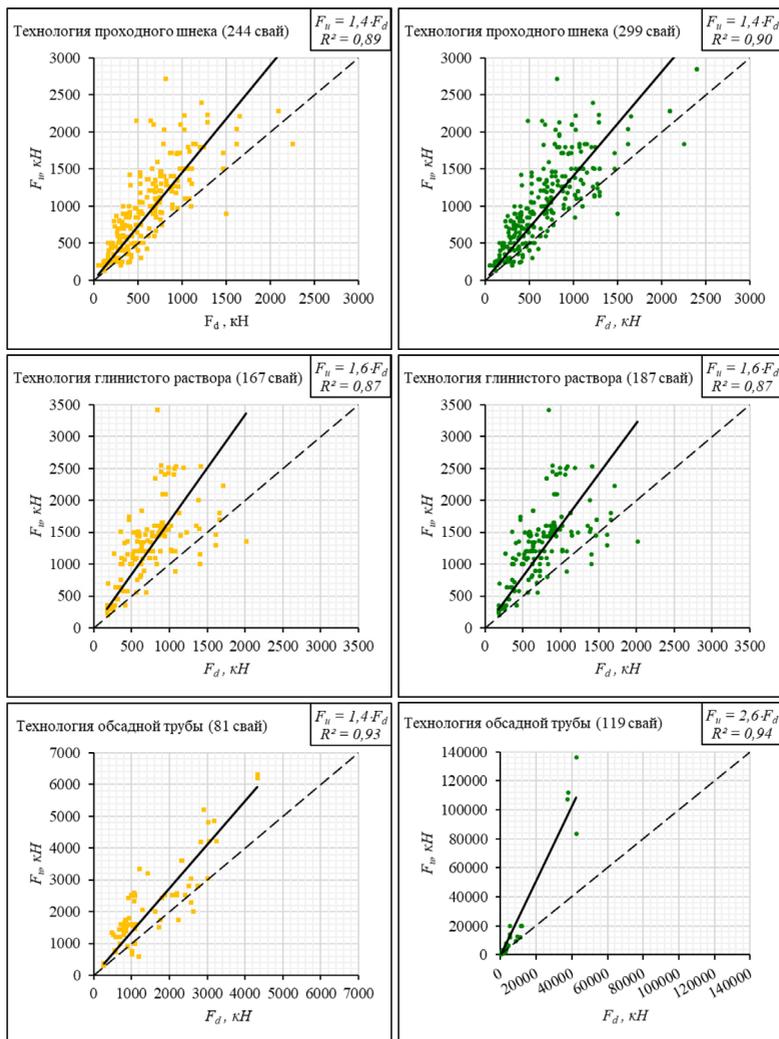
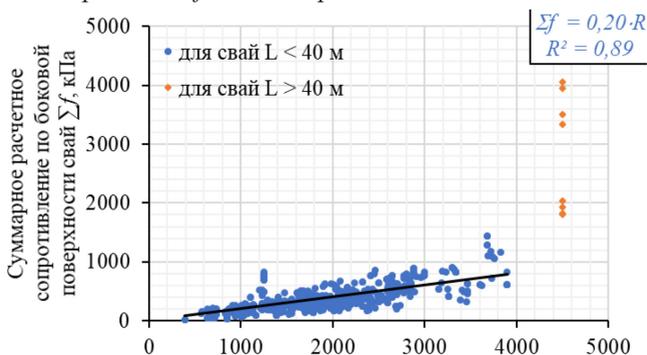


Рисунок 5. Сравнительные диаграммы значений несущей способности свай фактических и расчетных

■ – сваи в моренных отложениях; ● – сваи в моренных и вендских отложениях

Как видно из рисунка 5, несущая способность буровых свай, полученная по результатам полевых испытаний (условно назовем ее фактической), в моренных отложениях в зависимости от технологии изготовления, превышает расчетную, определяемую по нормативным требованиям в $1,4 \div 1,6$ раза, а фактическая несущая способность свай в вендских отложениях по результатам полевых испытаний превышает расчетную, определяемую по нормативным требованиям, до 2 раз и более. Занижение фактической несущей способности сваи приводит к значительному удорожанию проектного решения свайного фундамента.

На рисунке 6 показаны соотношения расчетных сопротивлений грунта по боковой поверхности Σf и под острием свай R .



Расчетное сопротивление под острием сваи R , кПа

Рисунок. 6. Сравнительная диаграмма сопротивления сваи по боковой поверхности и под острием сваи

Как видно из рисунка 6, суммарное расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности свай составляет порядка 20% от сопротивления грунта под острием сваи. Фактически, в Санкт-Петербурге до 60% длины сваи находится в сильнодеформируемом грунте с модулем деформации $E \leq 10$ МПа, поэтому свая, изготавливаемая в грунте, должна быть достаточно длинной (20...30 м и более), чтобы опираться на надежное прочное основание.

Дополнительно в результате статистической обработки и анализа полученных результатов полевых испытаний предлагается упрощенная формула для определения несущей способности буровых свай по грунту, которая может применяться в качестве предварительной оценки при проектировании и полевых испытаниях на строительных площадках:

$$F_d = R(A + 0,2 \cdot \gamma_{cf} \cdot u \cdot h_i), \quad (7)$$

где R , A , u , γ_{cf} , h_i – обозначения из формулы 7.11 СП 24.13330.2011.

Широко используется способ приближенного расчета висячих свай, который основан на использовании геометрических параметров свай и средней величины сопротивления грунта. По этому способу предельная нагрузка на сваю определяется по формуле:

$$N = u \cdot L \cdot \sigma = \pi \cdot D \cdot L \cdot R_s, \quad (8)$$

где L – длина свай, м; D – диаметр свай, м; R_s – осредненное сопротивление грунта, полученное в результате статических полевых испытаний свай, кПа.

По результатам обработки статических полевых испытаний 600 свай были получены значения осредненного сопротивления грунта: $R_s = 49$ кПа для свай залегания в моренных отложениях; $R_s = 68$ кПа для свай залегания в вендских отложениях.

*Несущая способность свай в зависимости
от глубины заложения острий свай*

В исследовании была вычислена несущая способность свай по техническим регламентам и проведена статистическая обработка (методом наименьших квадратов) результатов полевых испытаний более чем 600 буровых свай на вдавливающую нагрузку.

На основе краткой классификации основных видов грунтов, расположенных по боковой поверхности и под острием большинства свай, было выполнено условное разделение несущей способности буровых свай по грунту на две основные схемы: *I* – сваи залегания в моренных отложениях (492 свай) и *II* – сваи залегания в вендских отложениях (113 свай).

Из сравнительных диаграмм видно, что в зависимости от схемы расположения свай в грунте (схема *I*, *II*) фактическая несущая способность свай, определенная по результатам статических полевых испытаний, возрастает в 1,5÷2,6 раза от расчетного значения. Этот факт говорит о том, что, чем больше глубина расположения свай в грунте, тем в большую сторону отличается фактическая несущая способность свай от вычисленной по нормативным требованиям.

На рисунке 7 приведены сравнительные диаграммы соотношения несущей способности свай, получаемые расчетным методом и полевыми испытаниями в зависимости от схемы расположения свай в грунте.

В настоящее время определение несущей способности свай выполняется по регламентированной методике с максимальной глубиной заложения пяты сваи до 40 м от поверхности планировки, что не позволяет учитывать повышение сопротивления по пяте и боковой поверхности свай, расположенной на большей глубине. Однако условия современного высотного строительства требуют применения свай со значительно большей глубиной заложения, а рекомендации по расчетам таких свай в технических регламентах

отсутствуют. Для прогнозирования несущей способности свай длиной более 40 м выполнена нелинейная экстраполяция расчетных сопротивлений грунтов по боковой поверхности и под острием свай до глубины 100 м в зависимости от их физико-механических характеристик и глубины.

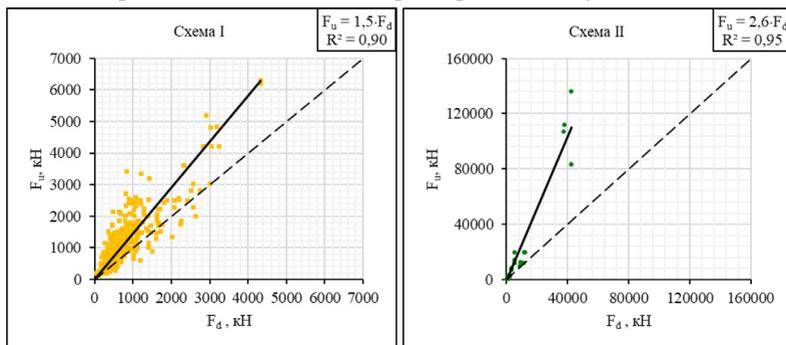


Рисунок. 7. Сравнительные диаграммы отношения несущей способности свай по результатам полевых испытаний и, вычисленной по требованиям норм

На рисунке 8 и в таблицах 5-6 приведены результаты нелинейной экстраполяции сопротивлений грунтов в зависимости от физических свойств грунтов по боковой поверхности и под пятой буровых свай.

Таблица 5 – Расчетные сопротивления грунтов по боковой поверхности свай

Расчетные сопротивления по боковой поверхности свай f , кПа					
Песков средней плотности	Крупных и средней крупности	Глинистых грунтов при показателе текучести I_L	0,2	$f = 34,716z^{0,2861}$	$R^2 = 0,9936$
	Мелких		0,3	$f = 24,349z^{0,2902}$	$R^2 = 0,9898$
	Пылеватых		0,4	$f = 16,917z^{0,3058}$	$R^2 = 0,9820$
	–		0,5	$f = 14,259z^{0,2644}$	$R^2 = 0,9477$
	–		0,6	$f = 10,503z^{0,2261}$	$R^2 = 0,8386$
	–		0,7	$f = 5,6088z^{0,2518}$	$R^2 = 0,8369$
	–		0,8	$f = 5,1753z^{0,1694}$	$R^2 = 0,6849$
	–		0,9	$f = 4,148z^{0,2027}$	$R^2 = 0,6752$
	–		1,0	$f = 3,241z^{0,2372}$	$R^2 = 0,6844$

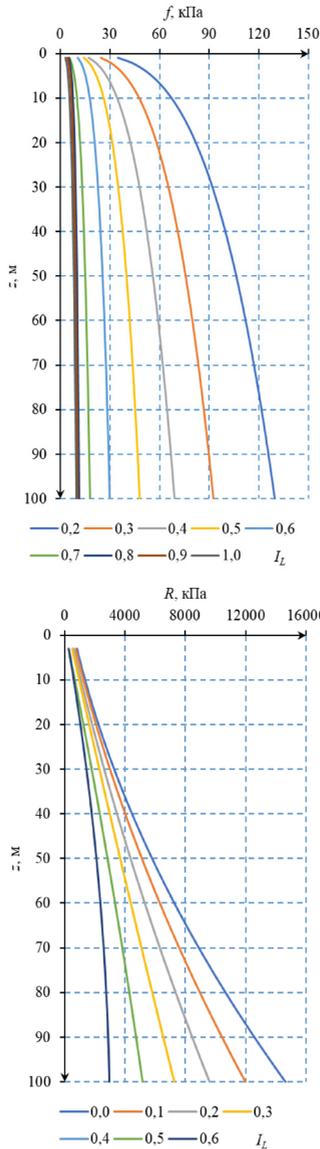


Рисунок 8. Графики распределения сил трения грунта по боковой поверхности сваи и под ее нижним концом до глубины 100 м

Таблица 6 – Расчетные сопротивления грунтов под нижним концом свай

Расчетные сопротивления R , кПа, под нижним концом набивных и буровых свай и свай-оболочек, погружаемых с выемкой грунта и заполняемых бетоном, при глинистых грунтах, за исключением просадочных					
Песков средней плотности	Гравелистых	Глинистых грунтов при показателе текучести I_L	0,0	$R = 0,7287z^2 + 67,372z + 636,88$	$R^2 = 0,9998$
	Крупных		0,1	$R = 0,4504z^2 + 69,632z + 500,81$	$R^2 = 0,9996$
	–		0,2	$R = 0,2499z^2 + 67,026z + 408,23$	$R^2 = 0,9984$
	Средней крупности		0,3	$R = 0,0403z^2 + 65,742z + 302,9$	$R^2 = 0,9998$
	Мелких		0,4	$R = -0,2019z^2 + 66,531z + 171,75$	$R^2 = 0,9991$
	Пылеватых		0,5	$R = -0,0861z^2 + 59,195z + 110,29$	$R^2 = 0,9985$
	–		0,6	$R = -0,2276z^2 + 51,595z + 99,61$	$R^2 = 0,9985$

Графики (рис. 8) и таблицы (таб. 5; таб. 6) могут использоваться для экспресс оценки несущей способности буровых свай длиной более 40 м.

В четвертой главе приведены результаты внедрения разработанного способа расчета несущей способности буровых свай по грунту с использованием корректирующих коэффициентов на объекте Санкт-Петербурга.

Для комплекса зданий проектом предусмотрен общий свайный фундамент на буровых сваях, выполняемых по технологии «под защитой обсадной трубы», диаметром 1,18 м и глубиной 34,2 м от поверхности земли (до абс. отм. –32,0 м). В рамках исследования выполнены расчеты несущей способности свай в зависимости от глубины заложения их острия в несущем слое грунта по аналитическому методу, по результатам исследований (прогнозирование несущей способности свай по корректировочному коэффициенту k и предлагаемых способов (по формуле 7)) и по результатам полевых статических испытаний свай. Величина расчетной несущей способности свай согласно СП значительно меньше значения, полученного по результатам статических полевых испытаний, а именно F_d (СП) = 6270 кН $\ll F_u$ (испытания) = 14840 кН (отношение $k = F_u/F_d = 2,36$). Очевидно, что разброс значений несущей способности более чем в 2 раза (200%) не является достаточной и достоверной величиной для проектирования свайного фундамента на данном объекте.

Несущая способность свай с применением корректирующего коэффициента k , приближается к значению несущей способности свай по результатам статических полевых испытаний, а именно отношение $F_u/(k \cdot F_d) = 14840/13165 = 1,12$.

На рисунке 9 показаны результаты расчета несущей способности свай в зависимости от глубины заложения остря до 34 м.

В таблице 7 представлено сравнение основных технических показателей несущей способности буровой свай.

Результаты полевых испытаний свай длиной 34 м подтвердили достоверность разработанного способа расчетов несущей способности свай путем ввода дополнительного корректирующего коэффициента.

На основе результатов аналитических расчетов с полученными корректирующими коэффициентами с достаточной точностью произведен прогноз несущей способности буровых свай до проведения статических полевых испытаний на строительном объекте. Проведенные после устройства свайного поля полевые испытания свай подтвердили несущую способность, определенную по методике автора.

Таблица 7 – Сравнение основных технических показателей несущей способности буровой свай

Основные параметры		Обозначение	Значение
Несущая способность свай по грунту, кН	метод СП 24.13330.2011	$F_{d,1}$	62 70
	предлагаемый способ по формуле (7)	$F_{d,2}$	6 820
Несущая способность свай по материалу, кН		F_{dm}	20 800
Предполагаемая несущая способность свай по исследованиям с использованием корректирующих коэффициентов, кН		$k \cdot F_{d,1}$	13 165
		$k \cdot F_{d,2}$	14 325
Несущая способность свай, полученная в результате полевых испытаний, кН		F_u	14 840
Допускаемая нагрузка на сваю, кН		N	12 360
Максимальное усилие в сваях путем численного моделирования, кН		P_{max}	10 840

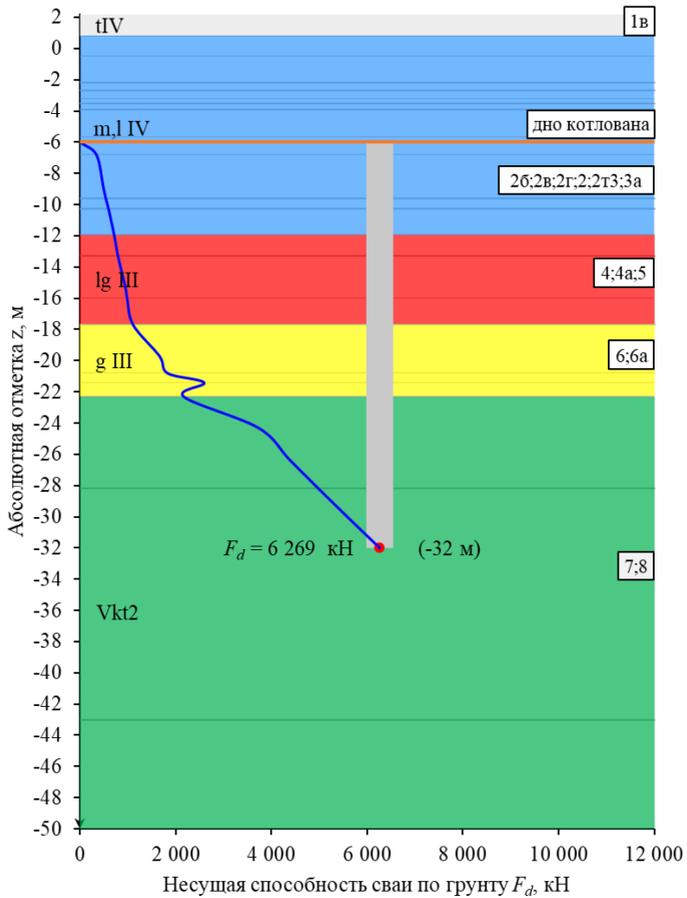


Рисунок. 9. Сопоставительный анализ несущей способности буровой сваи по глубине

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Обозначены границы применимости методов расчета несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, в зависимости от технологии изготовления и инженерно-геологических условий.

2. Разработаны схематичные карты глубин залегания кровли ледниковых моренных отложений и дочетвертичных вендских глин, которые преимущественно являются несущими грунтами свайных фундаментов, для Санкт-Петербурга. На этапе предварительного проектирования фундаментов рекомендовано использовать эти карты и назначать длину свай исходя из месторасположения объекта строительства в Санкт-Петербурге.

3. На основе анализа результатов многочисленных полевых статических испытаний буровых свай предложен корректирующий коэффициент $k = F_u/F_d$ для расчета несущей способности свай по грунту с достаточной точностью в зависимости от технологии изготовления и глубины заложения острия.

4. Разработан способ расчёта несущей способности буровых свай по грунту для получения более точных результатов, который значительно сокращает время расчета и может использоваться для предварительного этапа проектирования.

5. Построены графики для расчета несущей способности буровых свай глубокого заложения длиной от 40 м до 100 м на основе нелинейной экстраполяции сопротивления грунта.

6. Разработаны рекомендации по выбору метода расчета несущей способности свай, изготавливаемых в грунте, в зависимости от длины, технологии изготовления и генезиса грунтов под острием сваи (моренных или вендских отложений).

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ле Ван Чонг. Ускоренные способы определения несущей способности буровых свай / В. В. Конюшков, Л. Н. Кондратьева, В. М. Кириллов, Ле Ван Чонг // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3(74). – С. 52–60 (1,0/0,25 п. л.).

2. Ле Ван Чонг. Оценка несущей способности буровой сваи для строительства высотного здания с развитым подземным пространством / А. И. Осokin, В. В. Конюшков, И. П. Дьяконов, Ле Ван Чонг // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 4(75). – С. 58-67 (1,13/0,28 п. л.).

3. Ле Ван Чонг. Несущая способность буровых свай глубокого заложения / Ван Чонг Ле // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 3 (80). – С. 116-126 (1,25 п. л.).

Публикации в других изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science

4. V. T. Le. Analysis of bored piles' field test results / L. Kondratieva, V. Konyushkov, V. T. Le, V. Kirillov // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. – 2020. – № 828. – pp. 194-201 (0,44/0,11 п. л.).

5. V. T. Le. Side friction of sandy and clay soils and their resistance under the toe of deep bored piles (at a depth of up to 100 m) / V. V. Konyushkov, V. T. Le // Architecture and Engineering. – 2020. – № 1(5). – pp. 36-44 (1,0/0,5 п. л.).

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 15.06.2021. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 51.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

